

ANALISA EFISIENSI EXERGI *BOILER* WANSON III PADA UNIT KILANG DI PUSAT PENDIDIKAN DAN PELATIHAN MINYAK DAN GAS BUMI (PUSDIKLAT MIGAS) CEPU

*MSK. Tony Suryo U.¹, Eko Siswanto²

¹Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail : ekosiswanto4@gmail.com

Abstrak

Paper ini membahas analisa efisiensi exergi *boiler* wanson pada unit kilang di PUSDIKLAT MIGAS Cepu yang bertujuan untuk mengidentifikasi penggunaan energi sebenarnya atau hasil kualitas terhadap konsumsi energi aktual dan kehilangan energi sebenarnya akibat irreversibilitas proses. Karena *Boiler* merupakan sumber destruksi exergi terbesar dalam suatu sistem PLTU maupun sistem *plant*, sehingga kesempatan dalam meningkatkan efisiensi performansi sangat besar. Semakin besar efisiensi performansi *boiler* maka biaya produksi terhadap konsumsi bahan bakar suatu industri semakin rendah. Boiler yang dianalisa menggunakan bahan bakar Residu (MFO) dengan asumsi temperatur dan tekanan lingkungan masing-masing 25°C dan 1 bar dalam jangka waktu 24 jam.

Hasil analisa pada *boiler* wanson, nilai efisiensi exergi rata-rata bernilai 58.13% dan nilai efisiensi energi rata-rata bernilai 79.60%. Berdasarkan dari hasil penelitian bahwa total laju destruksi exergi di *boiler* sebesar 34.833 MW atau sebesar 38.92% dari exergi yang masuk sebesar 89.501 MW, dimana laju destruksi *combustor* memberikan kontribusi sebesar 24.60%, sedangkan laju destruksi *heat exchanger* memberikan kontribusi terbesar yaitu 14.32%.

Nilai efisiensi exergi total, efisiensi energi total dan laju destruksi total dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam* dan temperatur *steam*. Nilai efisiensi exergi dan laju destruksi exergi *combustor* dipengaruhi oleh temperatur bahan bakar MFO, temperatur udara pembakaran, *excess air*, pencampuran bahan bakar dengan udara dan sistem insulasi di *combustor*, Sedangkan nilai efisiensi exergi dan laju destruksi exergi *heat exchanger* dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam*, temperatur *flue gas*, kebersihan *tubes*, sistem insulasi dan jumlah *feedwater* yang terbuang di sistem *blowdown*.

Kata kunci: Boiler, Destruksi Exergi, Energi, Exergi

Abstract

This paper discusses the analysis of efficiency exergy of boiler Wanson on refinery unit at PUSDIKLAT MIGAS Cepu in order to identify the actual energy used or the quality results of the actual energy consumption and actual energy loss as a result from irreversible process. Boiler is the biggest source of exergy destruction in a Steam Power Plant's System and plant systems, hence there is a big opportunity to increase the efficiency in performance. Therefore the bigger efficiency in boiler's performance, the lower production cost for fuel consumption in industry. Boilers are analyzed using fuel Residue (MFO) on assuming constant environment temperature and pressure of 25°C and 1 bar within twenty-four hours. The result are the average efficiency exergy is 58.13% and the average energy efficiency is 79.60%. Based on the results of the research that the total rate of destruction exergy in the boiler is 34.833 MW or 38.92% of the incoming exergy of 89.501 MW. The rate of destruction combustor accounted for 24.60%, while the rate of destruction of the heat exchanger provides the largest contribution of 14.32%. The total exergy efficiency, total energy efficiency and total destruction rate are influenced by mass flow rate and the temperature of steam. Exergy efficiency and the rate of exergy destruction in combustor are influenced by fuel temperature, combustion air temperature, excess air, mixing fuel with air and insulation system in the combustor, while the value of the efficiency and the rate of exergy destruction of heat exchanger affected by mass flow rate of steam, flue gas temperature, cleanliness tubes, insulation and the amount of feedwater system wasted in the blowdown system.

Keywords: Boiler, Destruction Exergy, Energy, Exergy

1. Pendahuluan

Pada era ini, energi memiliki peran yang sangat krusial dalam kehidupan sehari-hari bahkan di dunia industri. Kebutuhan energi dunia terus mengalami peningkatan. Menurut proyeksi Badan Energi Dunia (International Energy Agency-IEA), hingga tahun 2030 permintaan energi dunia meningkat sebesar 45% atau rata-rata mengalami peningkatan sebesar 1,6% pertahun, tidak terkecuali di Indonesia [1]. Kebutuhan energi terus mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kegiatan pembangunan ekonomi suatu negara. Indonesia merupakan salah satu negara ekonomi berkembang yang terus melakukan kegiatan pembangunan di sektor industri. Keberlangsungan suatu industri sangat tergantung oleh energi yang tersedia. Berdasarkan data dari blueprint Pengelolaan Energi Nasional tahun 2006, Indonesia merupakan salah satu negara dengan persediaan sumber energi terbesar, namun dalam hal pemanfaatannya, Indonesia merupakan negara dengan pemanfaatan terendah [2]. Hal ini menunjukkan, Indonesia merupakan negara yang tidak efisien dalam pemanfaatan sumber energi. Analisa exergi bertujuan untuk menghitung potensial kerja maksimum suatu sistem untuk mencapai kesetimbangan dengan kondisi lingkungannya [3] dan mengidentifikasi terjadinya pemusnahan exergi yang dipandang sebagai kerugian-kerugian akibat perpindahan exergi yang mendampingi kalor dan kerja [4]. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, hasil analisa exergi di sistem *power plant* menunjukkan *boiler* merupakan penyebab utama dari kehilangan energi sebenarnya disebut penghancuran exergi [5].

Banyak pengkajian telah dilakukan mengenai analisis exergi pada mesin-mesin kalor, khususnya *boiler*. Penelitian mengenai energi dan exergi dilakukan oleh Rosen dan Scott [6], Aljundi [7], Rasad & Maihy [8], Saidur dkk. [9], Regulagadda dkk. [10], dan Reddy dkk. [11], yang menyajikan analisis energi dan exergi dari suatu sistem dan proses pada industri yang berbeda-beda.

Penelitian mengenai ilustrasi energi dan exergi pada sistem energi di zaman sekarang, seperti PLTA di Niagara Falls, PLTU dan sistem pemanas rumah, dilakukan oleh Rosen dan Scott [6]. Hasil yang diperoleh pada stasiun PLTU, dimana pada boiler khususnya, adalah efisiensi energi lebih besar dibandingkan dengan efisiensi exergi pada boiler, yang mana masing-masing bernilai 95% dan 50%. Dari hasil tersebut dapat ditunjukkan bahwa masih adanya kesempatan untuk meningkatkan efisiensi exergi dengan mengurangi sumber exergi dari sumber daya yang disediakan (mencocokkan penyediaan exergi sesuai permintaan), menggunakan alat untuk meningkatkan efisiensi exergi, meningkatkan temperatur produk panas terkirim, dan pemanfaatan limbah panas untuk kebutuhan proses.

Berdasarkan penjelasan diatas mengenai peningkatan performansi dengan analisa exergi, maka penelitian ini bertujuan untuk menentukan efisiensi exergi total, efisiensi energi total dan laju destruksi exergi total *boiler*. Kemudian membandingkan antara efisiensi exergi total dengan efisiensi energi total, menentukan efisiensi exergi dan mengevaluasi laju destruksi exergi di *combustor* dan *heat exchanger*. Apabila nilai exergi dan laju destruksi exergi total *boiler* dan kedua komponen diketahui, maka aliran exergi total *boiler* dapat dideskripsikan dengan menggunakan diagram Grassman.

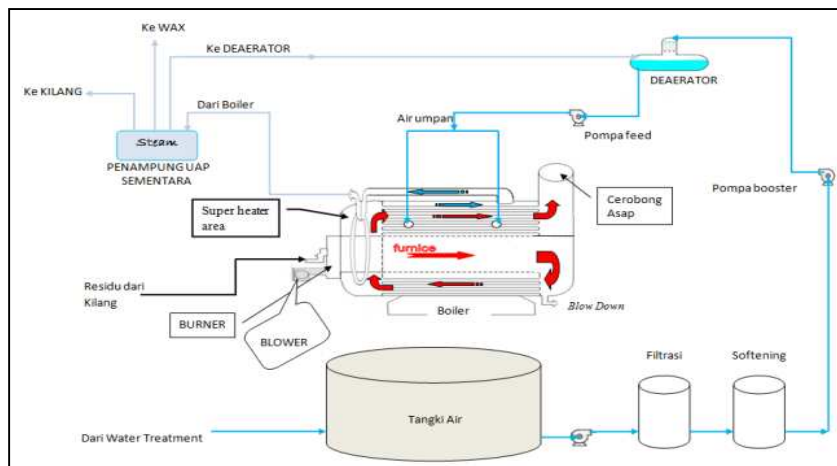
2. Metode Penelitian

2.1. Penjelasan Umum Pusdiklat Migas Cepu

Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 18 Tahun 2010 tentang Organisasi dan Tata Kerja Departemen Energi dan sumber Daya Mineral pasal 807 bahwa Pusat Pendidikan dan Pelatihan Minyak dan Gas Bumi mempunyai tugas melaksanakan pendidikan dan pelatihan bidang migas dan merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) [12].

2.2. Prinsip Kerja Boiler

Sistem kerja *boiler* khususnya pada *Boiler Wanson* menggunakan *boiler* pipa api (*fire tube boiler*), dimana air yang akan dirubah fase nya menjadi uap berada pada drum ketel uap. Bahan bakar adalah LPG dan Residu.



Gambar 1. Diagram Sirkulasi Air dan Uap pada boiler[12].

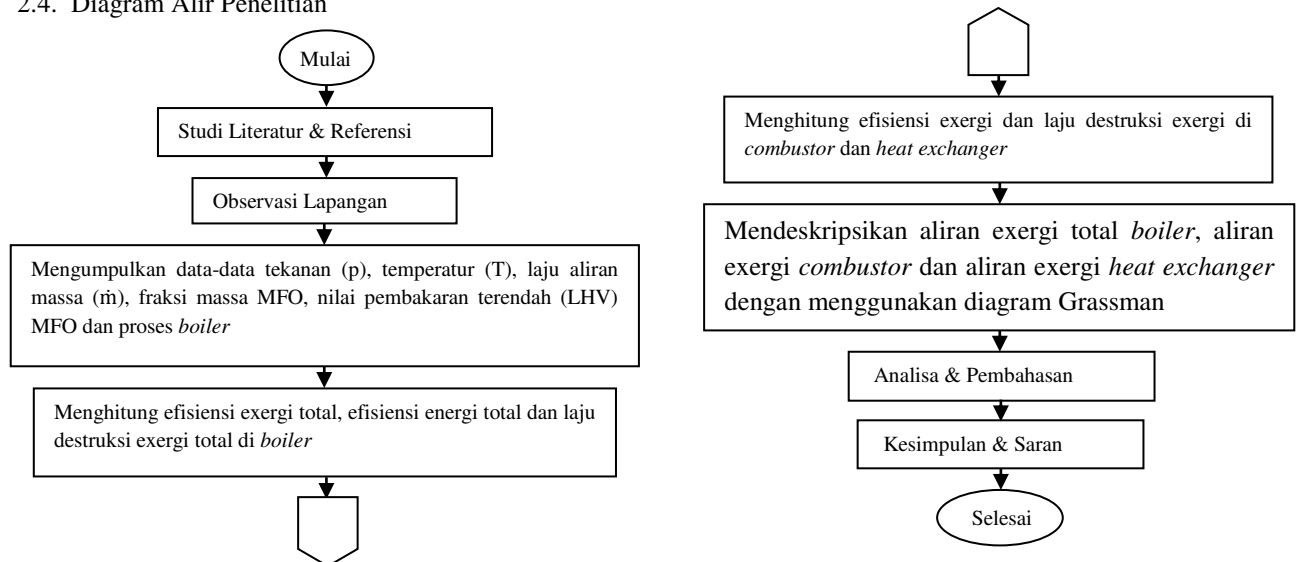
Air yang digunakan untuk dijadikan uap (*steam*) adalah air umpan ketel uap yang sudah diolah di pengolahan air (*water treatment plant*) berasal dari kali Bengawan Solo. Kemudian air dari *water treatment plant* diolah kembali di *boiler plant* dengan menggunakan *sand filter*, *softener* dan *deaerator* untuk agar memenuhi persyaratan air umpan *boiler*. Dari *deaerator* air ditampung pada *soft water tank*, air dipompa oleh *feed water pump* untuk disalurkan ke dalam *boiler*. Di dalam *soft water tank* air ditampung sementara dan akan disalurkan kedalam *boiler* sesuai kebutuhan. Proses kerja *boiler* dapat dilihat pada Gambar. *Boiler* yang terdapat di PUSDIKLAT MIGAS Cepu adalah merk *Wanson* dari Perancis yang merupakan *boiler* jenis pipa api dengan tekanan dan kapasitas rendah. *Boiler* yang berjumlah 3 buah, 2 buah cadangan dan 1 buah beroperasi [13].

Data-data yang diperlukan dalam perhitungan adalah tekanan (p), temperatur (T), laju aliran massa (\dot{m}), fraksi massa MFO, nilai pembakaran terendah (LHV) MFO dan proses *boiler*. Data-data tersebut diperoleh dari catatan rekaman data yang terdapat di ruang kontrol *boiler plant* unit kilang Pusdiklat Migas Cepu.

2.3. Definisi Exergi

Exergi adalah kerja maksimum teoritis yang mampu diperoleh saat sistem tersebut berinteraksi dalam mencapai kesetimbangan [4], atau juga dapat diartikan sebagai potensial kerja atau kualitas dari berbagai bentuk energi dalam kaitannya dengan lingkungan tertentu [5]. Tujuan dari analisa exergi adalah untuk mengidentifikasi adanya penghancuran exergi dan timbulnya kerugian serta mengurutkannya menurut tingkat kepentingannya. Exergi selalu mengalami penghancuran ketika proses yang melibatkan perubahan temperatur. Penghancuran exergi selalu diikuti dengan pertambahan entropi di sistem. Exergi yang mengalami penghancuran disebut juga anergi. Exergi selain dapat dihancurkan melalui sifat irreversibilitas proses tapi dapat juga dipindahkan ke atau dari dalam suatu sistem, sebagai suatu kerugian yang mendampingi perpindahan kalor ke sekitarnya.

2.4. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

2.5. Formulasi Exergi Pada Boiler.

Batasan - batasan masalah pada penelitian ini adalah energi kinetik dan energi potensial di dalam sistem diabaikan, tekanan dan temperatur lingkungan diasumsikan konstan pada $p_o = 1$ bar dan $T_o = 25^\circ\text{C}$ (295.15K), nilai laju aliran steam dan *feedwater* dianggap *steady state*, jumlah *feedwater* yang terbuang di sistem *blowdown* dianggap nol, proses pembakaran di *boiler* dioperasikan secara adiabatik dan udara, *flue gas* dan *heat product* dimodelkan sebagai gas ideal dan juga data yang digunakan dalam kurun waktu dua puluh empat jam.

Untuk kondisi *steady state* ($dm_{cv} = 0$), keseimbangan massa untuk sistem volume atur adalah [4].

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e \quad (1)$$

Campuran dari berbagai macam gas dianggap sebagai gas-ideal [3] $pV = n\bar{R}T$ (2)
Neraca exergi untuk sistem volume atur adalah [3].

$$\frac{d\dot{E}_{cv}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{cv} - p_o \frac{dV_{cv}}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_d \quad (3)$$

Laju perubahan exergi adalah [3] $E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH}$ (4)

Total exergi spesifik dari suatu sistem E adalah [3]
$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (5)$$

dimana $e^{KN}=e^{PT} = 0$, maka laju perpindahan exergi suatu aliran adalah [13]

$$\dot{E} = \dot{m} (e^{PH} + e^{CH}) \quad (6)$$

Mengacu dari Persamaan (3), laju destruksi exergi pada sistem volume atur adalah:

$$\dot{E}_D = \sum \dot{m}_i e_i - \sum \dot{m}_e e_e \text{ atau } \dot{E}_D = \dot{E}_i - \dot{E}_e \quad (7)$$

Pada Persamaan (6), nilai exergi fisika dan exergi kimia berbeda - beda tergantung dari jenis alirannya. Exergi fisika pada *steam, feedwater, liquid fuels* adalah [3]

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m}_e e^{PH} = \dot{m} [(h - h_o) - T_o(s - s_o)] \quad (8)$$

Exergi fisika pada *flue gas* adalah [3]

$$\dot{E}_{fg}^{PH} = \dot{m}_{fg} \cdot e_{fg}^{PH} = \dot{m}_{fg} \frac{(\bar{h}_{fg} - \bar{h}_o) - T_o(\bar{s}_{fg} - \bar{s}_o)}{M_{fg}} \quad (9)$$

Exergi kimia pada *Liquid Fuel* [14]

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \{ [1.0401 + 0.1728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{S}{C} (1 - 2.0628 \frac{H}{C})] LHV \} \quad (10)$$

Exergi kimia pada *flue gas* [3]

$$\dot{E}_{fg}^{CH} = \dot{m}_{fg} \bar{e}_{fg}^{CH} / M_{fg} \quad (11)$$

Exergi kimia *Steam* dan *Feed Water* [3]
$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \bar{e}^{CH} / M \quad (12)$$

Exergi fisika dan kimia pada *air* bernilai nol karena tidak terjadinya pertukaran substance terhadap lingkungan atau temperatur dan komposisi udara yang digunakan menyerupai komposisi udara pada lingkungan referensi [3]

$$\dot{E}_a^{PH} = \dot{E}_a^{CH} = 0 \quad (13)$$

Efisiensi exergi merupakan perbandingan antara *product exergy* dan *fuel exergy*, sehingga dapat dirumuskan [3].

$$\varepsilon = (\dot{E}_p / \dot{E}_f) \times 100\% \quad (14)$$

Efisiensi energi *boiler* adalah perbandingan antara energi yang keluar dengan energi yang masuk, persamaan (15) [4]

$$E = (\dot{E}_e / \dot{E}_i) \times 100\% \quad (15)$$

Produk panas hasil pembakaran yang terjadi di *combustor* berada pada kondisi campuran dimana produk panas yang dihasilkan berasal dari reaksi pembakaran antara bahan bakar dengan udara pada kondisi pembakaran sempurna dengan jumlah udara teoritis. Persamaan kesetimbangan energi untuk sistem reaktif basis per mol bahan bakar adalah [4]

$$\frac{Q_{cv}}{\dot{n}_f} - \frac{W_{cv}}{\dot{n}_f} = \bar{h}_p - \bar{h}_R \quad (16)$$

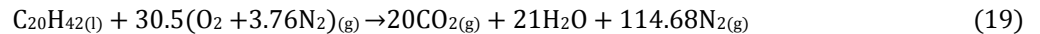
dimana nilai entalpi spesifik produk dan entalpi reaktan adalah
$$\bar{h}_p - \bar{h}_R = \sum p n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i \quad (17)$$

diketahui nilai entalpi spesifik suatu senyawa pada kondisi selain kondisi standard adalah
$$\bar{h} = \bar{h}^o + \Delta \bar{h} \quad (18)$$

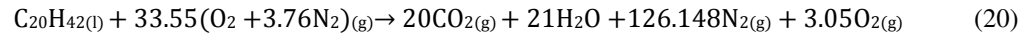
Diagram Grassman merupakan diagram yang berfungsi untuk menggambarkan aliran exergi dan destruksi exergi yang diadaptasi dari diagram Sankey yang berfungsi menggambarkan perpindahan energi di sistem pembangkit [21].

2.6. Reaksi Pembakaran MFO

Asumsikan panjang rantai karbon MFO adalah dua puluh (C_{20}), maka rumus kimia dari MFO adalah $C_{20}H_{42}$. Reaksi pembakaran sempurna MFO dengan jumlah udara teoritis adalah [4]



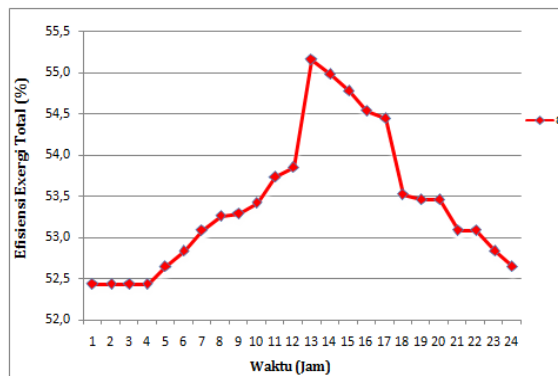
Asumsikan *excess air* bernilai 10% [4], sehingga reaksi pembakaran sempurna adalah



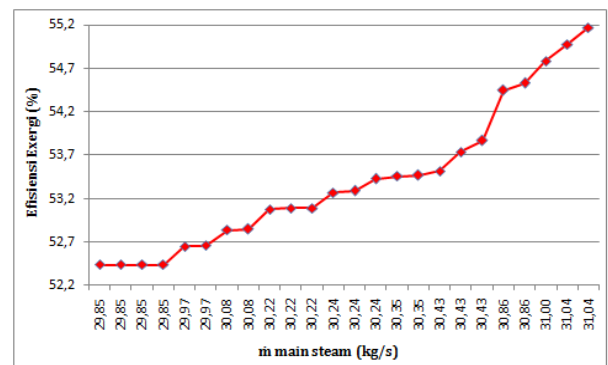
Excess air diperlukan pada seluruh praktek pembakaran untuk menjamin pembakaran yang sempurna dan menjamin kondisi *vent stack* sesuai yang memuaskan [4].

3. Analisa Dan Pembahasan

3.1. Efisiensi Exergi Total Boiler



Gambar 3. Efisiensi Exergi Total Boiler.

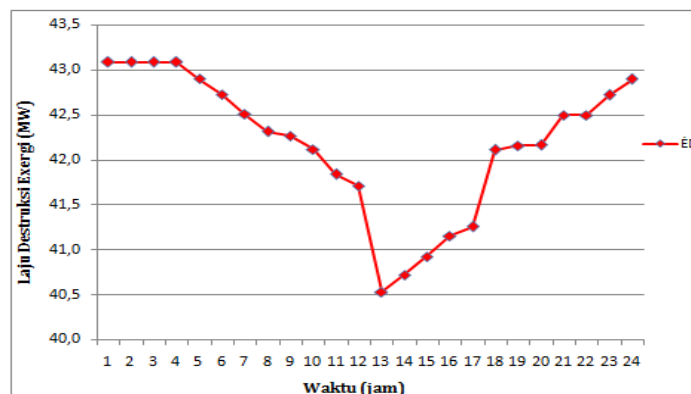


Gambar 4. Pengaruh laju steam terhadap efisiensi exergi.

Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan nilai efisiensi exergi terendah terjadi pada jam ke 1 sampai jam ke 4 sebesar 52.44% kemudian mengalami kenaikan dari jam 5 sampai jam 12 dan nilai efisiensi exergi total tertinggi terdapat pada jam ke 13 sebesar 55.17% kemudian mengalami penurunan nilai efisiensi exergi total pada jam ke 14 hingga ke 24. Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi lebih dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam* dan temperatur *steam*, sedangkan perubahan tekanan tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap nilai efisiensi exergi.

Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan efisiensi exergi tertinggi terjadi pada saat laju aliran massa *steam* berada pada nilai 31.04 kg/s dan efisiensi exergi terendah terjadi pada nilai 29.85 kg/s.

3.2. Laju Destruksi Exergi Total Boiler



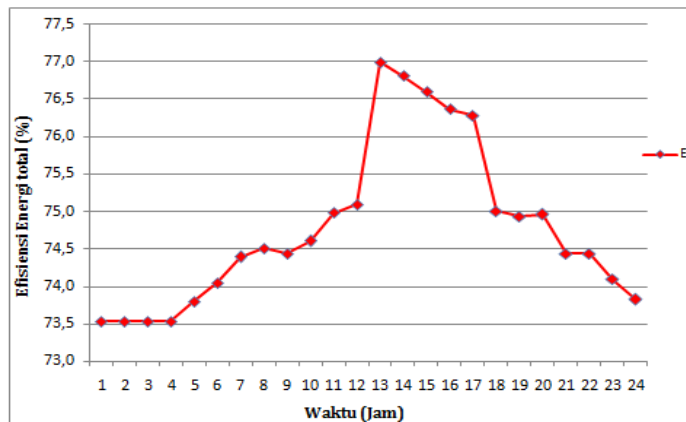
Gambar 5. Laju Destruksi Exergi Total.

Gambar 5 menunjukkan nilai laju destruksi exergi total terkecil yaitu 40.530 MW yang terdapat pada jam ke 13. Sedangkan nilai laju destruksi exergi total terbesar sebesar 43.084 MW terdapat pada jam ke 1 hingga jam ke 4.

Sistem di *boiler* terdiri dari dua komponen utama yaitu *combustor* dan *heat exchanger*. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terhadap analisa exergi di *boiler*, kedua komponen tersebut merupakan penyebab utama dari laju destruksi exergi sehingga laju destruksi exergi dapat dikurangi dengan melakukan perbaikan yang berguna untuk

meningkatkan efisiensi exergi *boiler*. Kehilangan energi di *boiler* dipengaruhi oleh banyak faktor, yaitu kehilangan energi akibat radiasi dan konveksi sebesar 4%, *blow down* sebesar 3% dan *flue gas* sebesar 18%. Disamping itu, 65% hingga 80% energi digunakan untuk mengubah *feedwater* menjadi *steam* [15].

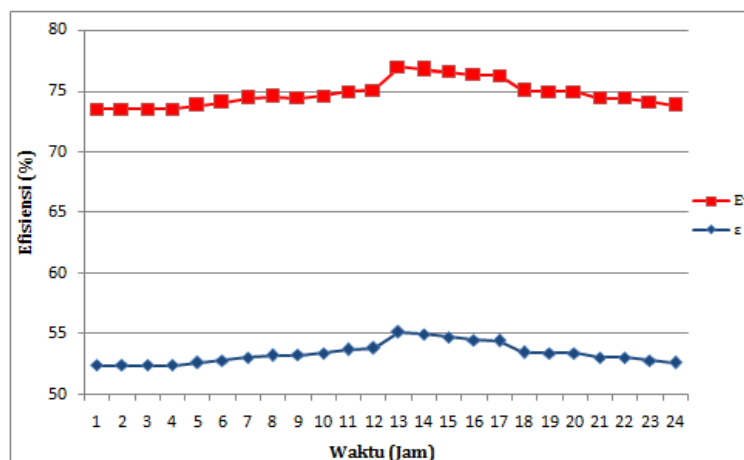
3.3. Efisiensi Energi Total Boiler



Gambar 6. Efisiensi Energi Total Boiler.

Dari Gambar 6 nilai efisiensi energi total tertinggi 77.0% terjadi pada jam ke 13, Sedangkan nilai efisiensi energi total terendah sebesar 73.5% terjadi pada jam ke 1 hingga jam ke 4. Kenaikan nilai efisiensi energi total yang signifikan terjadi pada jam ke 5 hingga ke 12, Sedangkan penurunan terjadi pada jam ke 14 hingga ke 24. Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi energi total lebih dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam* dan temperatur *steam*.

3.4. Perbandingan Efisiensi Exergi Dengan Efisiensi Energi Total Boiler



Gambar 7. Perbandingan Efisiensi Exergi Dengan Efisiensi Energi Total Boiler.

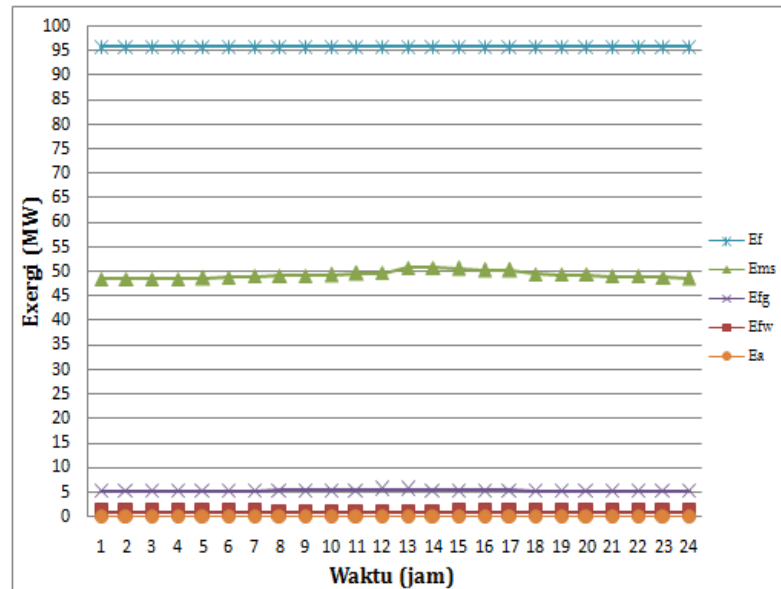
Gambar 7 menunjukkan nilai efisiensi energi total lebih besar dibandingkan dengan nilai efisiensi exergi total. Secara teori nilai efisiensi energi bernilai lebih besar dibandingkan efisiensi exergi karena hanya memperhitungkan entalpi saja, untuk memperhitungkan jumlah energi yang masuk dan energi yang terpakai sehingga diketahui energi yang hilang. Sedangkan efisiensi exergi tidak hanya memperhitungkan entalpi dan entropi saja tetapi juga memperhitungkan exergi kimia, untuk memperhitungkan produksi entropi akibat faktor irreversibilitas.

3.5. Exergi Total Boiler

Pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa exergi total terbesar di *boiler* pada Pusdiklat Migas Cepu terdapat pada bahan bakar atau fuel. Nilai exergi total fuel mempunyai nilai yang saling mendekati karena data fraksi mol dari komposisi MFO, data LHV dan data laju aliran massa fuel mempunyai nilai yang sama selama satu hari.

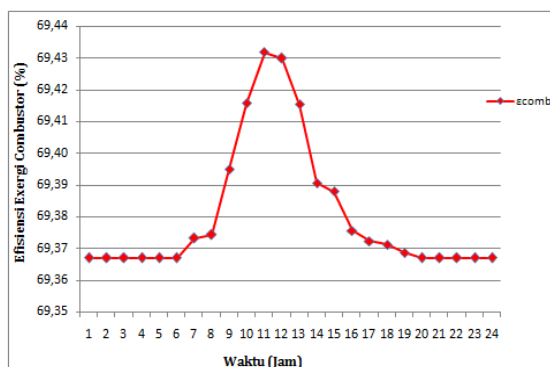
Udara memiliki nilai exergi total terkecil yaitu bernilai nol karena udara yang digunakan adalah udara langsung dari udara lingkungan yang temperatur, tekanan dan komposisi kimia sama dengan referensi. Kemudian nilai exergi total terbesar di boiler selanjutnya berturut-turut setelah nilai nilai exergi total bahan bakar diikuti oleh nilai exergi total main steam, flue gas dan feedwater. Pada main steam bernilai besar setelah fuel karena exergi fisika dari main steam

bernilai besar yang dipengaruhi oleh laju aliran massa, tekanan dan temperatur. Disamping itu, exergi kimia bernilai besar karena dipengaruhi oleh nilai laju aliran massa dan nilai molar dari steam.

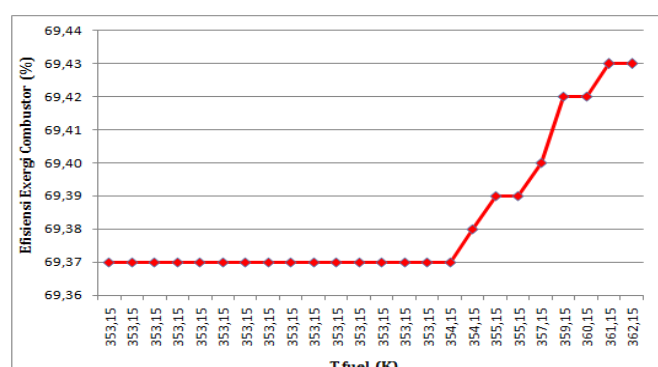


Gambar 8. Exergi Total Boiler.

3.6. Efisiensi Exergi Combustor



Gambar 9. Efisiensi Exergi Combustor



Gambar 10. Temperatur fuel terhadap efisiensi exergi combustor.

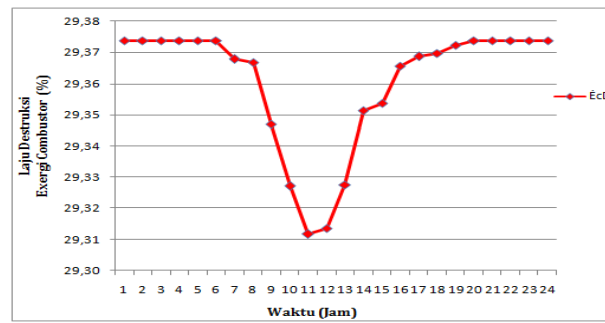
Berdasarkan Gambar 9 menunjukkan nilai efisiensi exergi *combustor* tertinggi yaitu sebesar 69,43% yang terdapat pada jam ke 11. Sedangkan nilai efisiensi exergi *combustor* terendah yaitu sebesar 69,37% yang terdapat pada jam ke 20 hingga jam ke 6. Berdasarkan data-data yang digunakan untuk perhitungan, faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi exergi pada *combustor* adalah temperatur bahan bakar. Sedangkan faktor yang lain yang menentukan efisiensi exergi di *combustor* adalah temperatur udara yang digunakan untuk pembakaran. Udara pembakaran yang dipanaskan terlebih dahulu akan menambah sempurna pembakaran bahan bakar karena nilai entalpi udara mengalami peningkatan sehingga semakin tinggi temperatur udara maka efisiensi exergi *combustor* mengalami kenaikan. Untuk meningkatkan efisiensi termis sebesar 1%, temperatur udara untuk pembakaran harus dinaikkan sebesar 20 °C [16].

Berdasarkan Gambar 10 bahwa nilai efisiensi exergi combustor tertinggi yaitu 69,43% ketika temperatur bahan bakar sebesar 362,15 K. Sedangkan nilai efisiensi exergi combustor terendah yaitu 69,37% terjadi pada saat temperatur bahan bakar bernilai 353,15 K.

3.7. Laju Destruksi Combustor

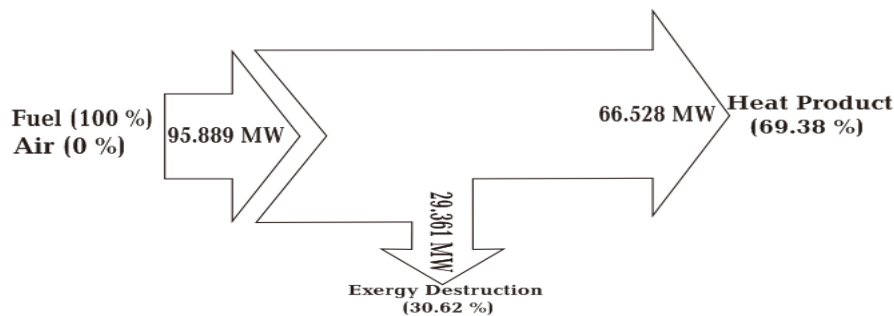
Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai laju destruksi exergi terkecil di *combustor* 29,312 MW terdapat pada jam ke 11. Sedangkan nilai laju destruksi exergi terbesar di *combustor* sebesar 29,374 MW pada jam ke 20 hingga jam ke 6.

Berdasarkan data - data yang digunakan dalam perhitungan bahwa nilai laju destruksi exergi di *combustor* juga dipengaruhi oleh temperatur bahan bakar dan temperatur udara yang digunakan untuk pembakaran. Semakin tinggi temperatur bahan bakar maka laju destruksi exergi *combustor* mengalami penurunan dan sebaliknya. Temperatur bahan bakar pembakaran yang tinggi menghasilkan nilai entalpi yang lebih tinggi sehingga kemungkinan bahan bakar mengalami destruksi exergi menjadi semakin rendah dan sebaliknya.



Gambar 11. Laju Destruksi Combustor.

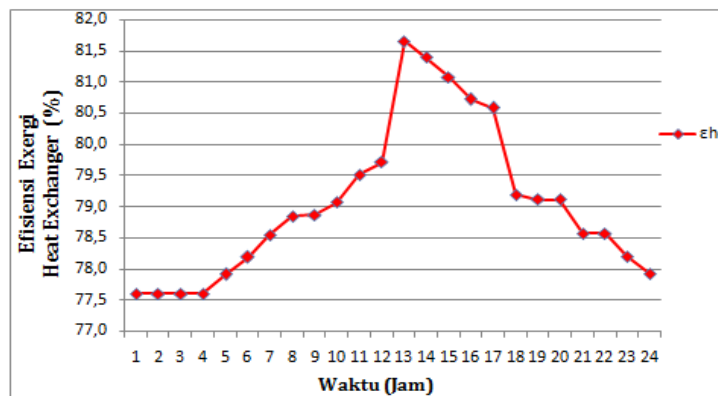
3.8. Diagram Grassman Aliran Exergi Combustor



Gambar 12. Diagram Grassman Aliran Exergi Combustor.

Berdasarkan Gambar 12 bahwa jumlah exergi rata-rata yang masuk combustor yaitu 95.889 MW yang didapat dari exergi dari *fuel* sebesar 100% dan exergi dari udara sebesar 0%. Jumlah laju destruksi exergi rata-rata *combustor* yaitu 29.361 MW atau 30.62% dari total exergi rata-rata yang masuk *combustor*. Exergi rata-rata yang terpakai menjadi *heat product* yaitu 66.529 MW atau 69.38% dari exergi rata-rata yang masuk *combustor*.

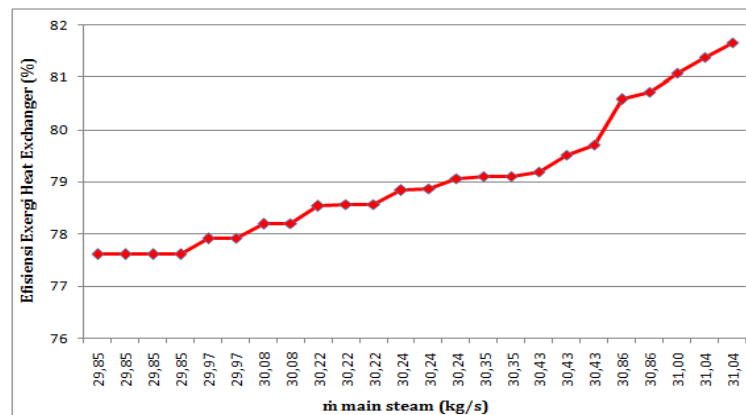
3.9. Efisiensi Exergi Heat Exchanger



Gambar 13. Efisiensi Exergi Heat Exchanger.

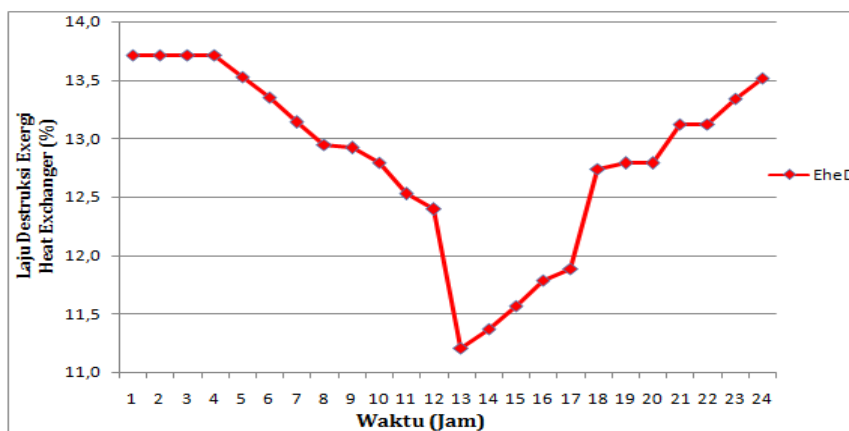
Gambar 13 menunjukkan nilai efisiensi exergi *heat exchanger* tertinggi sebesar 81.66% yang terdapat pada jam ke 13. Sedangkan nilai efisiensi exergi *heat exchanger* terendah yaitu 77.61% yang terdapat pada jam ke 1 hingga jam ke 4. Dari perhitungan analisa dapat disimpulkan, nilai efisiensi exergi *heat exchanger* lebih dipengaruhi oleh laju aliran steam dan temperatur steam, sedangkan perubahan tekanan tidak memberikan perubahan yang signifikan pada nilai efisiensi exergi *heat exchanger*.

Gambar 14 menunjukkan bahwa nilai efisiensi exergi *heat exchanger* tertinggi sebesar 81.55% yang terjadi pada saat laju aliran *steam* bernilai 31.04 kg/s dan efisiensi exergi *heat exchanger* terendah yaitu 77.61% terjadi pada saat laju aliran *steam* bernilai 29.85 kg/s. Pada saat laju aliran *steam* bernilai 30.43 kg/s tidak mengalami kenaikan dikarenakan tidak diikutinya kenaikan temperatur bahan bakar sehingga nilai efisiensi exergi pada *heat exchanger* tidak mengalami kenaikan.



Gambar 14. Efisiensi Exergi Heat Exchanger.

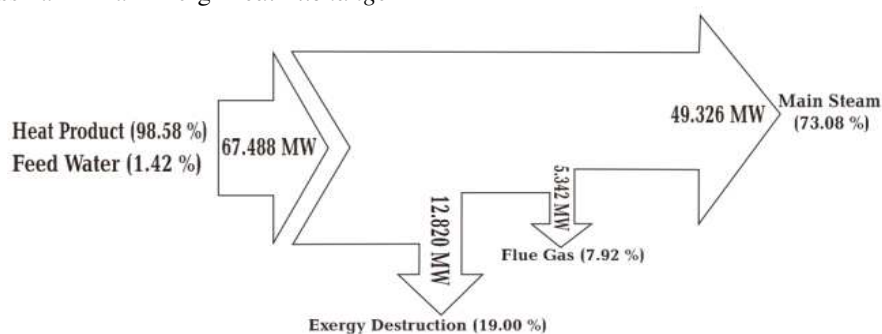
3.10. Laju Destruksi Exergi Heat Exchanger



Gambar 15. Laju Destruksi Exergi Heat Exchanger.

Gambar 15 menunjukkan bahwa laju destruksi exergi terkecil di *heat exchanger* yaitu 11.203 MW yang terdapat pada jam ke 13. Sedangkan laju destruksi exergi terbesar di *heat exchanger* sebesar 13.710 MW terdapat pada jam ke 1 hingga jam ke 4.

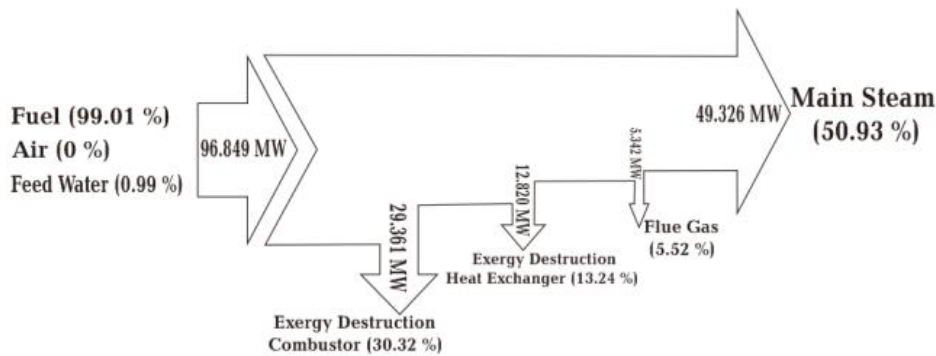
3.11. Diagram Grassman Aliran Exergi Heat Exchanger



Gambar 16. Diagram Grassman Aliran Exergi Heat Exchanger.

Berdasarkan Gambar 16 menjelaskan bahwa jumlah exergi rata-rata yang masuk *heat exchanger* yaitu 67.488 MW yang didapat dari exergi *heat product* sebesar 98.58% dan exergi *feedwater* sebesar 1.42%. Laju destruksi exergi rata-rata *heat exchanger* adalah 12.820 MW atau 19.00% dari total exergi rata-rata yang masuk *heat exchanger*. Exergi yang terbuang ke *flue gas* yaitu 5.342 MW atau 7.92%. Exergi rata-rata yang menjadi *main steam* yaitu 49.326 MW atau 73.08%. Pengurangan temperatur *flue gas* sebesar 20°C akan memperbaiki efisiensi *boiler* sekitar 1%. Namun temperatur normal *flue gas* berada pada rentang 175°C sampai 260°C karena temperatur *flue gas* tidak boleh terlalu rendah karena dapat menyebabkan pengembunan gas buang dimana dapat menyebabkan korosi pada *vent stack* akibat kandungan sulfur [16].

3.12. Diagram Grassman Aliran Exergi Total di Boiler



Gambar 17. Diagram Grassman Aliran Exergi Total di Boiler.

Berdasarkan Gambar 17 memperlihatkan bahwa total exergi rata-rata yang masuk ke boiler adalah 96.849 MW yang didapat dari exergi *fuel* sebesar 99.01%, exergi udara sebesar 0% dan exergi *feedwater* sebesar 0.99%. Laju destruksi exergi rata-rata keseluruhan adalah sebesar 42.181 MW atau sebesar 43.56% dari total exergi rata-rata yang masuk, dimana kontribusi dari laju destruksi exergi *combustor* sebesar 30.32%, laju destruksi exergi *heat exchanger* sebesar 13.24% dan laju destruksi exergi rata-rata pada *flue gas* sebesar 5.52%. Total exergi rata-rata yang menjadi *main steam* sebesar 49.326 MW atau 50.93% dari total exergi rata-rata yang masuk boiler.

4. Kesimpulan Dan Saran

4.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisa yang telah dilakukan serta uraian analisa dan pembahasan adalah

- 1) Nilai efisiensi exergi total tertinggi bernilai 55.17%, efisiensi energi total tertinggi bernilai 77.0% dan laju destruksi exergi total terendah bernilai 40.53 MW yang masing-masing terdapat pada jam ke 13. Sedangkan nilai efisiensi exergi total terendah yaitu 52.44%, efisiensi energi total terendah yaitu 73.5% dan laju destruksi exergi total tertinggi bernilai 43.084 MW yang masing-masing terdapat pada jam ke 1 hingga jam ke 4. Efisiensi exergi dapat dinaikan dengan cara menaikkan laju aliran massa *steam* dan temperatur *steam*.
- 2) Nilai rata-rata efisiensi energi total lebih besar yaitu 74.78% dibandingkan nilai rata-rata efisiensi exergi total yang bernilai 53.42%.
- 3) Pada *Combustor*, nilai efisiensi exergi tertingginya yaitu 69.43% dan laju destruksi exergi terendahnya bernilai 29.312 MW yang masing-masing terdapat pada jam ke 11. Sedangkan nilai efisiensi exergi terendahnya adalah 69.37% dan nilai laju destruksi exergi tertingginya 29.374 MW yang masing-masing terdapat pada jam ke 20 hingga jam ke 6. Peningkatan efisiensi exergi di *combustor* perlu diutamakan karena nilai laju destruksi exergi di *combustor* lebih besar daripada di *heat exchanger* yaitu dengan cara menaikkan temperatur bahan bakar MFO dan temperatur udara pembakaran, mengontrol *excess air*, menyempurnakan pencampuran bahan bakar dengan udara dan memperbaiki sistem insulasi di *combustor*.
- 4) Pada *Heat Exchanger*, nilai efisiensi exergi tertingginya yaitu 81.66% dan laju destruksi exergi terendahnya yaitu 11.203 MW yang masing-masing terdapat pada jam ke 13. Sedangkan nilai efisiensi exergi terendahnya bernilai 77.61% dan laju destruksi exergi tertingginya bernilai 13.710 MW yang masing-masing terdapat pada jam ke 1 hingga jam ke 4. Peningkatan efisiensi exergi di *heat exchanger* dapat dilakukan dengan cara menaikkan laju aliran massa *steam*, menurunkan temperatur *flue gas*, menjaga kebersihan *tubes*, memperbaiki sistem insulasi dan mengatur jumlah *feedwater* yang terbuang di sistem *blowdown*.
- 5) Diagram Grassman aliran exergi total di boiler yaitu exergi total rata-rata yang masuk ke boiler adalah 96.849 MW, dimana kontribusi dari exergi *fuel* sebesar 99.01%, exergi udara sebesar 0% dan exergi *feedwater* sebesar 0.99%. Total exergi rata-rata yang terpakai sebesar 56.45% dari total exergi rata-rata yang masuk yaitu sebesar 54.668 MW. Kontribusi dari *flue gas* sebesar 5.52%, dan *main steam* sebesar 50.93%. Laju destruksi exergi rata-rata adalah sebesar 42.181 MW atau sebesar 43.56% dari total exergi rata-rata yang masuk. Kontribusi dari laju destruksi exergi *combustor* sebesar 30.32% dan laju destruksi exergi *heat exchanger* sebesar 13.24%.

4.2. Saran

Saran-saran berdasarkan dari hasil analisa yang telah dilakukan antara lain:

- 1) Pusdiklat Migas Cepu sebaiknya memasang alat ukur di saluran udara menuju boiler. Sehingga jumlah laju aliran massa udara dapat diukur dan mempermudah pengaturan jumlah kebutuhan udara agar terciptanya pembakaran yang maksimal, bukan menggunakan data spesifikasi laju aliran volumetrik *forced draft fan*. Juga untuk memperoleh *excess air* aktual untuk menghasilkan persamaan reaksi kimia *flue gas* yang lebih akurat, bukan berdasarkan asumsi *excess air* 10%.
- 2) Pusdiklat Migas Cepu sebaiknya memasang alat ukur di *combustor* agar dapat mengetahui temperatur pembakaran *heat product* bukan berdasarkan asumsi pada kondisi adiabatik.

- 3) Pusdiklat Migas Cepu sebaiknya menganalisis komponen penyusun *flue gas*. Sehingga diperoleh persamaan reaksi kimia aktualnya, bukan berdasarkan asumsi bahwa dalam kondisi pembakaran sempurna.
- 4) Pusdiklat Migas Cepu sebaiknya memperbaiki sistem di *combustor* dengan cara menyempurnakan sistem pencampuran *fuel* dan udara pembakaran, memperbaiki insulasi di *combustor*.
- 5) Pusdiklat Migas Cepu sebaiknya memperbaiki sistem di *heat exchanger* dengan cara membersihkan dan menjaga kebersihan tube di *boiler*.

5. Daftar Pustaka

- [1] Anonim, *Hingga 2030 Permintaan Energi Dunia Meningkat*, Website www.esdm.go.id (diakses tanggal 12 juli 2014).
- [2] Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006, 2006, *Blue Print Pengelolaan Energi Nasional 2006-2025*, Jakarta : Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral RI.
- [3] Bejan, A., George, T., and Michael, M., 1996, *Thermal Design & Optimization*, Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Moran, M.J., and Howard, S., 2006, *Fundamental Of Engineering Thermodynamics*, Ed. 5. England: John Wiley & Sons Ltd.
- [5] Gorji, M., *Exergy, The Potential Work*, Iran, Noshirvani University Of Technology.
- [6] Rosen, M.A., and David, S.S., 2002, *Entropy Production and Exergy Destruction: Part II-Illustrative Technologies*, International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 1315 – 1323.
- [7] Aljundi, I.H., 2008, *Energy And Exergy Analysis Of A Steam Power Plant In Jordan*, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 324-328.
- [8] Rashad, A., and ElMaihy, A., 2009, *Energy And Exergy Analysis Of A Steam Power Plant In Egypt*, ASAT- 13, May 26 – 28, 2009.
- [9] Saidur, R.J., Ahamed, U., and Masjuki, A., 2009, *Energy, Exergy, And Economic Analysis Of Industrial Boilers*, Energy Policy 38 (2010) 2188–2197.
- [10] Regulagadda, P., Dincer, I., and Naterer, G.F., 2010, *Exergy Analysis Of A Thermal Power Plant With Measured Boiler And Turbine Losses*, Applied Thermal Engineering 30 (2010) 970-976.
- [11] Reddy, V.S., Kaushik, S.C., Tyagi, S.K., and Panwar, N.L, 2010, *An Approach To Analyse Energy And Exergy Analysis Of Thermal Power Plants: A Review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1857–1872.
- [12] Buku Profil PUSDIKLAT MIGAS CEPU, Perpustakaan Pusdiklat Migas Cepu.
- [13] Wanson, Manual Book Wanson Steam Block, Perancis: PT. Wanson. 1976.
- [14] Kotas, T. J., 1995, *The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis*, Florida: Krieger Publishing Company.
- [15] Paul, D., Friedrch, F., 2001, *Boilers & Heaters : Improving Energy Efficiency*, Canada, August.
- [16] UNEP, 2008, “Boiler & Pemanas Fluida Thermis” United Nation Environment Program.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Pendidikan Dan Pelatihan Minyak Dan Gas Bumi (PUSDIKLAT MIGAS) Cepu karena telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan proses pengambilan data sehingga karya ilmiah ini dapat terselesaikan.